

РАБОТА ОГРАЖДЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**Аннотация**

На основе анализа принятой методики расчета теплопоглощения стенок тепловых агрегатов и роли аккумуляционных процессов в конструировании и эксплуатации надежной и эффективной изоляции сформулирована задача динамики теплопередающих стенок. Предложенная система уравнений, полученная методами интегрального преобразования Лапласа основных уравнений в пространстве и во времени, позволила описать широкий спектр реальных тепловых режимов при известных теплофизических свойствах материалов ограждений агрегатов. Приведены значения передаточных характеристик, связывающих в динамике изменения температуры поверхностей стенки с изменениями тепловых потоков; полученные передаточные характеристики аппроксимированы полиномами. Динамические процессы адаптированы к реальным режимам эксплуатации тепловых агрегатов. Условия однозначности сформулированы как для конвективного, так и для радиационного механизмов теплового взаимодействия поверхностей стенки со средой.

Ключевые слова: тепловой поток, аккумуляция, динамика, интегральные преобразования, передаточные функции, переходные процессы, тепловые режимы.

Abstract

Based on the analysis of the adopted methods of calculation of heat absorption of the walls of the heating units and the role of sedimentary processes in the construction and operation of a reliable and effective isolation problem is formulated as the dynamics of the heat transfer walls. The system of equations obtained by the methods of integral Laplace transformation of the governing equations in space and in time, allowed us to describe a wide range of real thermal conditions at a known thermophysical properties of materials of fencing units. Given the values of the transmission characteristics linking the dynamics of change of temperature of wall surfaces with changes of heat flow; the resulting transfer characteristic approximated by polynomials. Dynamic processes adapted to the actual modes of operation of the thermal units. The uniqueness conditions are formulated both for convective and radiative mechanisms of thermal interaction between the wall surfaces with the environment

Keywords: thermal stream, accumulation, dynamics, integral transformations, transfer functions, transient processes, thermal regimes.

Проблемы проектирования и эффективной эксплуатации ограждений металлургических и теплоэнергетических агрегатов включают в себя при известных физико-химических свойствах материалов ограждений и способов их защиты оценку влияния режимно-технологических параметров на их надежность. Выбор материалов ограждений основывается на тепловом расчете обмуровки при стационарных и нестационарных условиях [1–3], причем расчет при стационарном тепловом состоянии, когда плотность теплового потока $q_{cm} = const$, является классическим при различной степени учета изменений с температурой теплофизических свойств материалов ограждений. Вариативно учитывается ориентация наружных поверхностей в пространстве. В нестационарных тепловых условиях рассмотрен разогрев из холодного состояния и два режима, построенных на допущениях по величине термического сопротивления обмуровки.

Обмуровка считается термически тонкой при размере $\delta_1 < (a \cdot \tau_u)^{0,5}$ при одном слое обмуровки и при размере первого слоя $\delta_1 < 0,4 (a \cdot \tau_u)^{0,5}$, где $a = \lambda/\rho c$, м²/ч, и $\tau_u = \sum \tau_i$ – полный цикл

подъема, выдержки и снижения температуры в часах. Теплопоглощение стенок при циклической работе представляется суммой стационарных потерь и аккумуляционной части; стационарные потери определяются с учетом температур и длительностей отдельных периодов цикла, нестационарные потери на аккумуляцию – по специальным графикам. Для термической массивности стенок оба компонента тепловых потоков определяются аналитически [1–3].

Принятые при разработке этих методик допущения не позволяют учесть все особенности динамики переноса теплоты через стенку при изменяющихся условиях и выбрать эффективное решение.

Более широкие возможности представляет подход к процессам переноса теплоты в динамическом режиме с применением интегрального преобразования Лапласа [4–7]. Это позволяет связать все факторы, влияющие на процесс переноса теплоты в стенке от поверхности «1» к поверхности «2» в виде следующих уравнений:

$$J_1 = W_{11}J_1^* + W_{12}J_2^* ; \quad (1)$$

$$J_2 = W_{21}J_1^* + W_{22}J_2^* ; \quad (2)$$

$$\mathcal{Q}_{c1} = W_{11}^c J_1^* - W_{12}^c J_2^* ; \quad (3)$$

$$\mathcal{Q}_{c2} = W_{21}^c J_1^* - W_{22}^c J_2^* , \quad (4)$$

где

$W_{11} = U(y \cdot \text{sh} y + Bi_2 \cdot \text{ch} y)$; $W_{21} = Bi_2 \cdot U$; $W_{12} = Bi_1 \cdot U$; $W_{22} = U(y \cdot \text{sh} y + Bi_1 \cdot \text{ch} y)$; $W_{11}^c = W_{22}^c = U[\text{ch} y + (Bi_1 \cdot \text{sh} y)]$; $W_{12}^c = W_{21}^c = U = \{ \text{ch} y [(Bi_2 \cdot (1 + Bi_1 \cdot \text{th} y / y) + y \text{th} y [(Bi_2 \cdot (1 + Bi_1 \cdot \text{th} y / y) + Bi_1 / \text{ch} y)]^1; y = p^{0.5} u + iv, J = \Delta q / q_{\text{смау}}; \mathcal{Q} = \Delta t / \Delta t_{\text{смау}}; p – комплексный аргумент в преобразовании Лапласа, соответствующий безразмерному времени $Fo = a\tau / \delta^2$ в области оригиналов, δ – толщина стенки, м; $a = \lambda / \rho c$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; $Bi_1 = \alpha_1 \delta / \lambda$; $Bi_2 = \alpha_2 \delta / \lambda$; τ – время процесса, с. Вынужденные компоненты изменений тепловых потоков на поверхностях стенки, формируемые внешними для динамики стенки факторами отмечены символом (*).$

Динамика переноса теплоты через ограждение полностью описывается системой (1)–(4), множители в правой части перед J_1^* и J_2^* – передаточные функции, их характерные особенности определяются наличием нулей и полюсов. Для определения полюсов передаточных функций W_{ij} необходимо приравнять нулю при $\text{ch} y \neq 0$ выражение из знаменателя $(Bi_1 + Bi_2) \cdot \text{ch} y + (Bi_1 \cdot Bi_2 + y^2) \cdot \text{sh} y = 0$. Из условий равенства нулю действительной и мнимой части этой зависимости определяются два уравнения, одно из которых тождественно равно нулю, а второе приводит к характеристическому уравнению для определения v

$$\text{ctg} v = \frac{v^2 + Bi_1 \cdot Bi_2}{(Bi_1 + Bi_2) \cdot v} = \frac{v + Bi_1 \cdot Bi_2 / v}{Bi_1 + Bi_2} . \quad (5)$$

Достоверность этого уравнения устанавливается просто, когда-либо $Bi_1 = 0$, либо $Bi_2 = 0$, что соответствует адиабатическим условиям на одной из стенок. При этих условиях уравнение (5) отвечает одностороннему нагреву и $\text{ctg} v = v / Bi_1$, либо $\text{ctg} v = v / Bi_2$, поэтому при численном анализе уравнения можно использовать справочные данные по корням трансцендентного уравнения [8].

Для практических целей удобно применить аппроксимации, разложив целые функции, входящие в передаточные $W_{11}, W_{12} \dots W_{22}^c$ в ряды Тейлора в окрестности точки $p = 0$. Разделив числитель и знаменатель передаточных функций на выражение $Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2$ и применив аппроксимацию, получим

$$W_{12} = k_1 / (1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots) \approx k_1 / (1 + a \cdot p); \quad (6)$$

$$W_{22} = (b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots) / (1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots) \approx (b_0 + b_1 p) / (1 + a_1 p); \quad (7)$$

$$W_{11} = (c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + \dots) / (1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots) \approx (c_0 + c_1 p) / (1 + a_1 p); \quad (8)$$

$$W_{21} = k_1/(1 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + \dots) \approx k_2/(1 + a_1 \cdot p); \quad (9)$$

$$W_{11}^c = W_{22}^c = (d_0 + d_1 \cdot p + d_2 \cdot p^2 + \dots)/(1 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + \dots) \approx (d_0 + d_1 \cdot p)/(1 + a_1 \cdot p); \quad (10)$$

$$W_{12}^c = W_{21}^c = N/(1 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + \dots) \approx N/(1 + a_1 \cdot p). \quad (11)$$

В этих зависимостях $N = 1/(Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2)$; $k_1 = Bi_1 \cdot N$; $k_2 = Bi_2 \cdot N$;
 $a_n = N[1/(2n-1)! + (Bi_1 + Bi_2)/(2n)! + Bi_1 Bi_2/(2n+1)!]$; $b_0 = k_1$; $b_n = N[1/(2n-1)! + Bi_1/(2n)!]$; $c_0 = k_2$;
 $c_n = N[1/(2n-1)! + Bi_2/(2n)!]$; $d_0 = N[(1 + Bi_1)/(2n-1)!]$; $d_n = N[Bi_1/(2n+1)!]$. θ

Анализ соотношений (6)–(11) показывает, что возмущения тепловых потоков передаются через стенку, динамические свойства которой соответствуют свойствам типового инерционного звена первого порядка с коэффициентами передачи (усиления) k_1 или k_2 и постоянной времени a_1 . Температуру стенки и тепловые потоки через нее связывает цепочка элементарных звеньев, на одной параллельной ветви которой – инерционное звено с коэффициентом передачи d_0 и постоянной времени d_1 , на другой – последовательное соединение дифференцирующего и инерционного звеньев. Такими же цепочками звеньев описывается обратная связь теплового потока с температурами поверхностей стенки.

Характеристики динамических процессов (6)–(11) получены с помощью решений фундаментальных уравнений переноса теплоты через стенку методами интегральных преобразований Лапласа при условиях однозначности в виде чисел Био – Bi_1 и Bi_2 . Числа Био представляют собой отношение двух термических сопротивлений переносу теплоты $Bi = (\delta/\lambda)/(1/\alpha)$, где $R_{mn} = \delta/\lambda$ – термическое сопротивление теплопроводности стенки толщиной δ , м, и теплопроводностью λ , Вт/м·К, относится к термическому сопротивлению теплоотдачи на поверхности стенки $R_{mo} = 1/\alpha$. Таким образом, числа Био формируют температурное поле стенки при конвективном законе теплоотдачи.

Если преобладающим механизмом переноса теплоты через поверхность стенки является излучение, то в условия однозначности вместо чисел Био вводятся числа Старка $Sk = R_{mn}/R_{изл} = (\delta/\lambda)/[(T_{cm}/100)/E_0\epsilon]$, где E_0 , Вт/м², – интегральная плотность собственного излучения поверхности стенки с температурой T_{cm} и степенью черноты ϵ .

В работе [9] поставлена и решена задача относительно изменения температуры стенки со стороны горячей среды $\vartheta_{c1} = W_{11}^c J_1^*$ без учета влияния обратной связи, то есть, при $J_2^* = 0$. Этот случай соответствует условию, когда режим охлаждения не зависит от температуры стенки t_{c2} . Для ступенчатого и синусоидального изменения плотности теплового потока J_1^* определены переходные характеристики, что позволило решить задачу расчета предельных процессов без разрушения стенки.

Для аналогичных задач необходимо по фактическим изменениям параметров определить вид режима в реальном безразмерном времени $f(Fo)$ и соответствующую ему функцию для ϑ или J в изображениях умножить на передаточную функцию W и произвести обратное преобразование Лапласа $L^{-1}\{L[f(Fo) \cdot W]\}$ для перехода в область оригиналов. Так, одноступенчатое изменение J_1^* можно заменить серией ступенчатых изменений в сумме дающих необходимое изменение. Такой шадающий режим применяется при необходимости учета термолабильных свойств материала. При числе ступеней n и продолжительности каждой Fo_{cm} общее описание в области оригиналов $f(Fo) = 1 + [Fo/Fo_{cm}]$ при $(n-1)Fo_{cm} < Fo < n(Fo_{cm})$; этому выражению в области изображений соответствует $L[f(Fo)] \div 1/p \left(1 - e^{-Fo_{cm} \cdot p}\right) = [1 + \text{cth}(0,5Fo_{cm} \cdot p)]/2p$ [10]. Для получения решения в области оригиналов необходимо произвести обратное преобразование Лапласа над функцией $L[f(Fo)]$, умноженной на передаточную функцию W соответствующего звена, то есть $L^{-1}[1 + \text{cth}(0,5Fo_{cm} \cdot p) \cdot (W/2p)]$. Аналогично решается задача с П-образным возмущением с $f(Fo) = 1$ при $0 < Fo < Fo_{cm}$ и $f(Fo) = 0$ при $Fo > Fo_{cm}$; этот режим наблюдается, когда продолжительность ступени скачкообразного изменения ограничена Fo_{cm} .

Выводы. Метод интегральных преобразований в применении к динамическим процессам в теплопередающей стенке тепловых агрегатов позволяет описать целый спектр реаль-

ных динамических режимов и выбрать рациональный вариант, отвечающий положениям энерго – и ресурсосбережения.

Список использованных источников

1. Ратников В.Ф. Теплопоглощение стенками при периодической работе печей / В.Ф.Ратников // Известия вузов. Черная металлургия. 1962. №2. – С. 153–162.
2. Зобнин Б.Ф. Аккумуляция тепла при несимметричных периодических колебаниях температуры / Б.Ф. Зобнин // Кузнечно-штамповочное производство. 1965. №7. – С.37– 44.
3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / А.М. Бакластов, В.М. Бродянский, Б.П. Голубев [и др.] // Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 532 с.
4. Лымбина Л.Е. Изменение температуры стенки воздушной фурмы при контакте с жидким металлом / Л.Е. Лымбина, Ю.Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1986. №10. – С. 103–107.
5. Лымбина Л.Е. Перенос тепла через стенку воздушной фурмы в нестационарном режиме / Л.Е. Лымбина, Ю.Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. 1986. № 4. – С. 112–115.
6. Торопов Е.Е. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса в ограждениях тепловых агрегатов / Е.Е. Торопов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2007. – 162 с.
7. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования / Г. Дёч. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
8. Телегин А.С. Тепломассоперенос: учеб. для вузов / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под. ред. Ю.Г. Ярошенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Академкнига, 2002. – 455 с.
9. Теплопередача через стенку в динамическом режиме / Е.В. Торопов, Л.Е. Лымбина, Е.Е. Торопов, Ю.Г. Ярошенко // Творческое наследие Б.И.Китаева: труды Международной науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. – С. 355–358.
10. Корн Г.А. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы / Г.А. Корн, Т.М. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамановича. – Изд. 5-е. – М.: Наука, 1984. – 832 с.

УДК 624.9

Р. Р. Хасанов, Д. А. Данилова, Г. И. Худякова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕРСИИ КОКСОВОГО ОСТАТКА ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Аннотация

В данной работе был приведен анализ параметров конверсии твердых топлив таких как: торф, бурый уголь, кузнецкий уголь и антрацит, с различными характеристиками (влажность, выход летучих, зольность). Проанализированы и рассчитаны параметры конверсии данных топлив. Описаны основные топлива, применяемые в металлургии, процесс их подготовки и коксования. Рассмотрена возможность применения коксовых остатков торфа, бурого угля, кузнецкого угля, антрацита в металлургическом процессе. Рассчитаны скорости конверсии в зависимости от времени и степени выгорания образца в процессе конверсии топлива. Построены графики скорости убыли массы топлив в зависимости от параметров. Результаты расчетов конверсии сведены в таблицу.